

УДК 681.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОМ ОБОБЩЕННОМ ВОЗМУЩЕНИИ

В.А. ГАНЭ, Н.Т. АХМЕД

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 28 апреля 2011

Математическое моделирование и анализ качества функционирования робастной системы при детерминированном обобщенном возмущении проведем на примере силовой следящей системы, состоящей из измерителя рассогласований, усилительно-преобразовательных элементов, исполнительного устройства и объекта управления. Представим передаточную функцию исполнительской части силовой системы в виде инерционного пропорционального интегрирующего регулятора (ПИ-регулятора)

Ключевые слова: математическое моделирование, робастная система, силовая следящая система.

Введение

Одной из основных фундаментальных проблем общей теории систем и управления является проблема так называемой информационно-ресурсной неопределенности. Решение данного вопроса, как в научном, так и в практическом отношении возможно в виде приближенных или прогнозных оценок границ изменений неопределенных условий и режимов функционирования систем.

Теоретическими подходами для научного обоснования технического и организационного построения систем, рационального выбора информационно-ресурсных управлений, обеспечивающих сохранение требуемого качества функционирования и работоспособности в условиях интервально-ограниченной неопределенности, являются:

- адаптивный подход, включающий принципы, процедуры и алгоритмы критериальной самоорганизации;
- подход, основанный на нечетких множествах и нечеткой логике;
- интервально-робастный подход.

Определено место робастного подхода в теории адаптации следящих систем в условиях нестационарных изменений параметров и характеристик возмущений. В прикладном отношении обоснованы и сформулированы постановки задач повышения робастности координатных систем слежения за воздушными объектами.

В стадии апробации находятся возможности повышения качества управления без организации дополнительных измерительных каналов. Результат достигается включением в структуру штатной системы робастных обратных связей, компенсирующих обобщенное возмущение. Приводятся примеры структур робастных следящих систем.

Теоретический анализ и результаты

Математическое моделирование и анализ качества функционирования робастной системы при детерминированном обобщенном возмущении проведем на примере силовой следящей системы, состоящей из измерителя рассогласований, усилительно-преобразовательных элементов, исполнительного устройства и объекта управления. Представим передаточную

функцию исполнительской части силовой системы в виде инерционного пропорционального интегрирующего регулятора (ПИ-регулятора):

$$K_{\text{ич}}(p) = \frac{K_{\text{ич}}}{p \cdot (1 + T_M \cdot p)}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ич}}$ – коэффициент преобразования исполнительской части силовой системы; T_M – механическая постоянная времени исполнительного двигателя.

Пересчитаем статический момент нагрузки двигателя к выходу исполнительской части системы. Структурная схема силовой следящей системы, составленной из функционально-необходимых элементов (ФНЭ), в линейном приближении предоставлена на рис. 1.

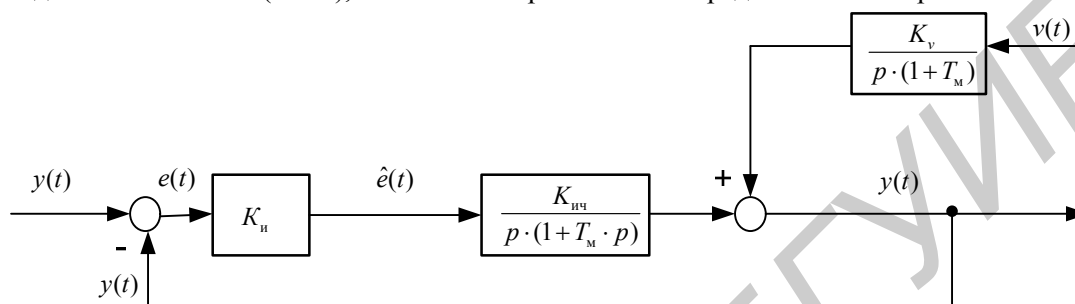


Рис. 1. Структурная схема силовой следящей системы, составленной из функционально-необходимых элементов

На рис. 1 через коэффициент K_v обозначено

$$K_v = 1 / (F_d \cdot q_0^2),$$

где F_d – жесткость исполнительного двигателя постоянного тока; q_0 – оптимальное передаточное число понижающего редуктора.

В качестве параметрического возмущения (пертурбаций) выберем нестационарное изменение коэффициента преобразования исполнительской части $K_{\text{ич}}$, а внешним возмущением $v(t)$ выберем изменение момента нагрузки двигателя постоянного тока.

Перейдем от непрерывной модели к дискретной. Для этого необходимо проквантовать по времени задающее $x(t)$, возмущающее $v(t)$ воздействия, выходную переменную системы $y(t)$, истинное рассогласование $e(t)$ и его измеренное значение $\hat{e}(t)$, а передаточные функции измерителя рассогласований $K_{\text{и}}$ и исполнительской части системы $K_{\text{ич}}(p)$ заменить их дискретными аналогами. При цифровом управлении учитываются особенности перехода от режима фильтрации к режиму экстраполяции. В режиме фильтрации выходная переменная формируется по текущему значению сигнала рассогласования, а в режиме экстраполяции – по измеренному значению сигнала рассогласования на предыдущий момент дискретного времени. Режим экстраполяции учитывает особенности машинной обработки сигнала рассогласования, связанные с обменом информацией между арифметическим устройством, постоянной и оперативной памятью. С учетом этого структурная схема дискретной модели силовой следящей системы изображена на рис. 2.

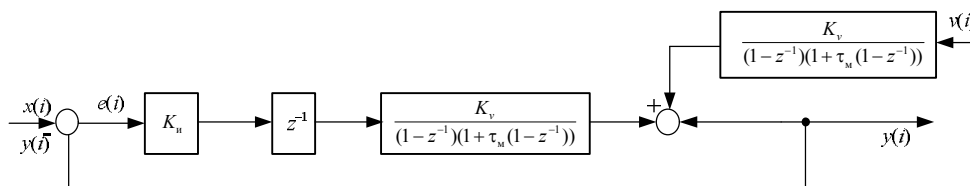


Рис. 2. Структурная схема дискретной модели силовой следящей системы, составленной из функционально-необходимых элементов

Для обеспечения заданных динамических свойств силовых следящих систем в качестве желаемого закона управления выбирается пропорциональный интегродифференцирующий закон управления (ПИД-управление).

Этот закон реализуется в «штатных» силовых следящих системах путем охвата нестационарных элементов корректирующей и стабилизирующей обратными связями. Структурная схема дискретной модели «штатной» силовой следящей системы изображена на рис. 3.

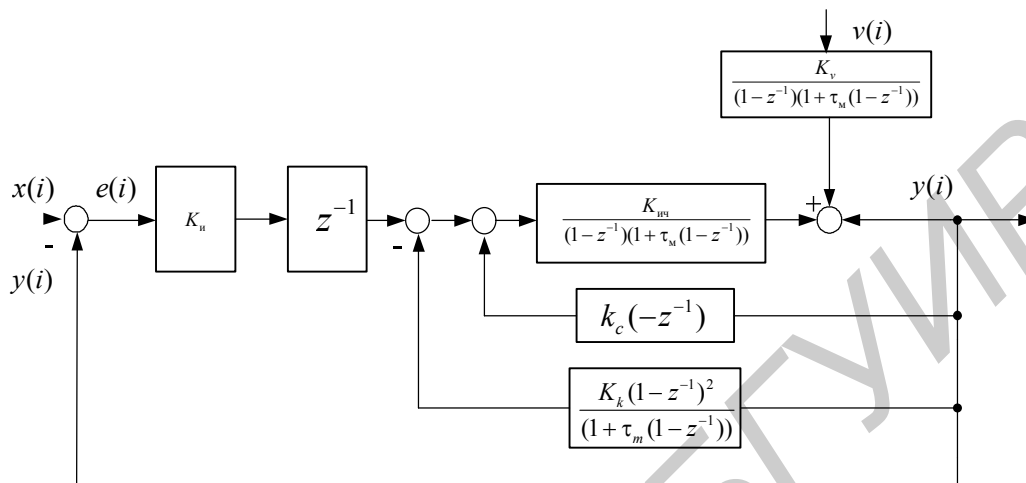


Рис. 3. Структурная схема дискретной модели «штатной» силовой следящей системы

Для модели силовой следящей системы определим отклонения изменения коэффициента преобразования исполнительской части системы:

$$K_{ич} = K_{ич}^0 + \delta K_{ич}, \quad (2)$$

механической постоянной времени исполнительского двигателя

$$\tau_m = \tau_m^0 + \delta \tau_m \quad (3)$$

и коэффициента преобразования формирующего фильтра по внешнему возмущению

$$K_v = 0 + \delta K_v \quad (4)$$

Структурная схема робастной силовой следящей системы изображена на рис. 4. Коэффициент преобразования $K_{ич}$ и механическая постоянная времени τ_m такой системы включают в свой состав номинальный коэффициент преобразования $K_{ич}^0$ и номинальную механическую постоянную времени τ_m^0 , на которые настраивается система, и $\delta \tau_m$, $\delta K_{ич}$ – отклонения механической постоянной времени и коэффициента преобразования от номинального значения в процессе эксплуатации системы. Кроме того, на силовую следящую систему воздействуют внешние возмущения. Основными нестационарностями и внешними возмущениями силовой следящей системы являются следующие.

1. Изменение коэффициента преобразования исполнительской части системы:

- уменьшение скачком на определенный уровень при выходе из строя каскада усилителя постоянного напряжения;
- уменьшение по линейному закону при изменении степени компенсации электромашиного усилителя за счет изменения сопротивления компенсационной обмотки при изменении ее температуры;
- уменьшение по квадратичному закону при уменьшении числа оборотов приводного двигателя электромашиного усилителя за счет увеличения скольжения при долговременной нагрузке.

2. Изменение механической постоянной времени приводного двигателя:

- возрастание по линейному закону при изменении активного сопротивления якоря за счет нагрева двигателя.

3. Изменения внешнего возмущения (момента нагрузки):
- возрастание по линейному закону при увеличении вязкого трения за счет понижения температуры окружающей среды;
 - возрастание по квадратичному закону за счет перемещения объекта управления в вертикальной плоскости.

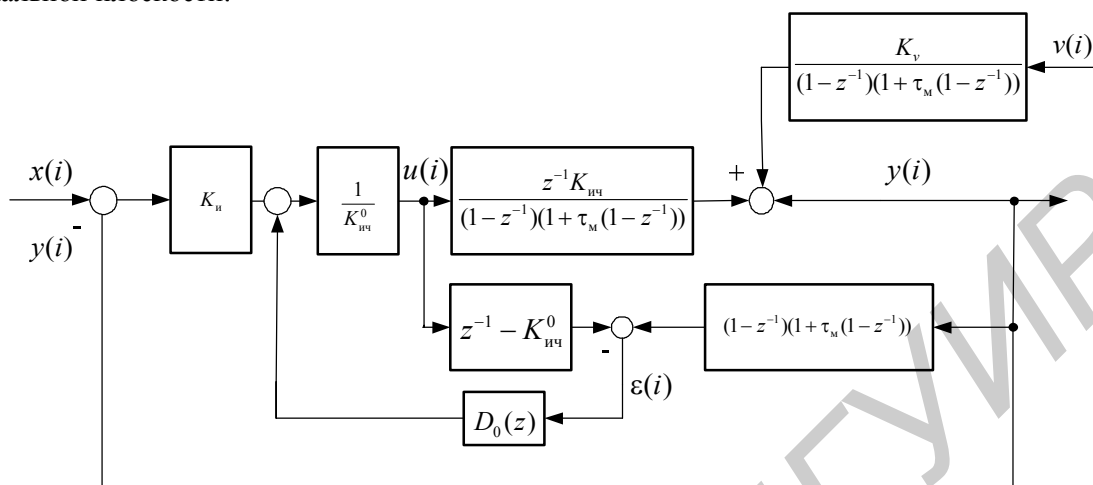


Рис. 4. Структурная схема робастной силовой следящей системы

Для определения полиномов предсказания, осуществляющих поглощение параметрических и внешних возмущений, опишем робастную силовую следящую систему следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (1-z^{-1})(1+\tau_m(1-z^{-1}))y(z) &= z^{-1}K_{нчч}(z)u(z) + \delta K_v(z)v(z), \\ u(z) &= \frac{(x(z) - y(z))K_n - \varepsilon(z)D_0(z)}{K_{нчч}^0} \tau_m(1-z^{-1})y(z), \\ \varepsilon(z) &= (1-z^{-1})(1+\tau_m(1-z^{-1}))y(z) - z^{-1}K_{нчч}^0 u(z). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для определения полинома предсказания определенных параметрического и внешнего возмущений необходимо из системы уравнений (5) выразить $\varepsilon(z)$. Однако выражение для невязки $\varepsilon(z)$ получается громоздким и зависит не только от изменяющихся параметрических и внешних возмущений, но и от задающего воздействия. При определении полинома предсказания необходимо получить Z-преобразование от невязки на текущий и предыдущие моменты времени и разделить их между собой. Решить эту задачу достаточно сложно, а получить структуру полинома предсказания по полученному выражению зачастую вообще невозможно. Исходя из этого, целесообразно синтезировать полином предсказания не по аналитическому выражению, а с использованием экспериментальных данных моделирования. В этом случае экспериментальным путем необходимо получить зависимости невязки при параметрических, внешних возмущениях и различных законах изменения задающего воздействия. Определив закон изменения невязки, необходимо выбрать синтезированный полином предсказания, настроенный на этот закон изменения невязки, и подставить его в робастную следящую систему. Таким образом, задача выбора полинома предсказания для робастной силовой следящей системы сводится к определению закона изменения невязки. При моделировании используем параметры непрерывной силовой следящей системы [1]:

$$\begin{aligned} K_n &= 500 \text{ [В/рад]}; & K_{фчв} &= 0,1; & K_y &= 800; & K_{эму} &= 4,26; \\ K_d &= 2,94 \text{ [рад/В} \cdot \text{с]}; & K_p &= 6,2 \cdot 10^{-4}; & T_m &= 0,02 \text{ [с]}. \end{aligned}$$

При этом коэффициент преобразования прямой цепи системы $K = 310 \text{ [с}^{-1}\text{]}$, а механическая постоянная времени $T_m = 0,02 \text{ [с]}$. Выберем период повторения $T_n = 0,01 \text{ с}$. В этом случае коэффициент преобразования прямой цепи системы $K \cdot T_n = 3,1$, а механическая постоянная времени $\tau_m = 2$.

Выбор закона изменения невязки производится при определенных параметрических, внешних возмущениях и законах изменения задающего воздействия, исходя из данных математического моделирования. Невязка определяется в робастной силовой следящей системе при отсутствии в системе полинома предсказания.

Математическое моделирование робастной силовой следящей системы при постоянных параметрах модели и постоянном (не изменяющемся во времени) возмущающем воздействии показывает, что невязка в системе изменяется скачком на постоянную величину. Необходимый для поглощения такого обобщенного возмущения полином предсказания, согласно (4), равен $D_0(z) = 1$. Зависимости ошибок по возмущениям в силовых системах при постоянном возмущающем воздействии представлены на рис. 5.

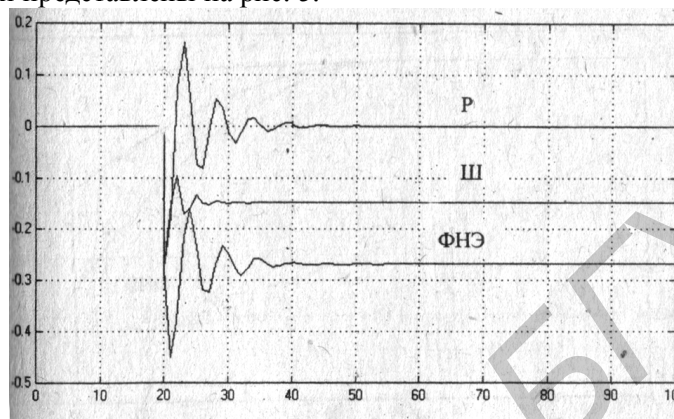


Рис. 5. Ошибки по возмущениям в силовых системах при постоянном возмущающем воздействии

ФНЭ – ошибка в силовой следящей системе, состоящей из функционально-необходимых элементов, Ш – ошибка в «штатной» (скорректированной) силовой следящей системе и Р – ошибка в робастной силовой следящей системе.

Анализ ошибок по возмущениям в силовых системах показывает, что силовая система, состоящая из функционально-необходимых элементов, и «штатная» силовая система подвержены воздействию внешних возмущений, которые ухудшают качество их работы. Использование фильтров поглощений в робастной силовой системе позволяет производить компенсацию внешних возмущений.

Заключение

Анализ ошибок в силовых системах при детерминированных изменениях коэффициента преобразования исполнительской части показывает, что ошибка установившегося режима меньше в робастной силовой системе, чем в «штатной» системе и системе из функционально-необходимых элементов. Однако длительность переходных процессов в робастной системе больше, чем в «штатной» системе и системе из функционально-необходимых элементов. Силовая следящая система, состоящая из функционально-необходимых элементов, наиболее чувствительна к изменениям коэффициента преобразования исполнительской части. За счет стабилизирующей обратной связи ошибка в «штатной» силовой следящей системе менее чувствительна к изменениям коэффициента преобразования исполнительской части. Наилучшим качеством обладает робастная силовая следящая система, в которой за счет робастной обратной связи происходит полная компенсация вариаций преобразования при его скачкообразном изменении.

Проанализируем влияние изменений механической постоянной времени исполнительского двигателя на процессы в рассматриваемых системах. Очевидно, что изменения механической постоянной времени исполнительского двигателя наибольшим образом сказываются на переходном режиме системы. Исходя из этого, целесообразно исследовать показатели качества переходного режима в рассматриваемых системах при различных значениях механической постоянной времени в отсутствие внешних возмущений и изменений коэффициента преобразования исполнительской части систем. Результаты проведенного исследования сведены в таблицы 1–3.

Таблица 1. Зависимость локальных показателей качества переходного режима от механической постоянной времени исполнительного двигателя в силовой системе, состоящей из функционально-необходимых элементов

Показатели качества	Механическая постоянная времени, с						
	0,015	0,017	0,02	0,022	0,025	0,027	0,03
H_M %	68,6	70,1	68,8	66,5	62	64	68,6
t_y , с	2	2	2	2	2	3	3
t_p , с	12	13	14	15	18	19	20

Таблица 2. Зависимость локальных показателей качества переходного режима от механической постоянной времени исполнительного двигателя в «штатной» силовой следящей системе

Показатели качества	Механическая постоянная времени, с						
	0,015	0,017	0,02	0,022	0,025	0,027	0,03
H_M %	123,6	107	86,3	74,7	59,7	52,4	61,9
t_y , с	1	1	1	1	1	2	2
t_p , с	5	6	7	8	10	10	11

Таблица 3. Зависимость локальных показателей качества переходного режима от механической постоянной времени исполнительного двигателя в робастной силовой следящей системе

Показатели качества	Механическая постоянная времени, с						
	0,015	0,017	0,02	0,022	0,025	0,027	0,03
H_M %	43,8	57,3	68,8	72,6	74,6	79,4	-
t_y , с	2	2	2	2	2	3	-
t_p , с	6	9	14	20	40	81	-

Анализ локальных показателей переходного режима показывает, что наилучшими показателями качества переходного режима обладает «штатная» силовая следящая система за счет цепи корректирующей обратной связи. При номинальном значении механической постоянной времени ($T_M=0,02$ с), качество переходного режима в робастной системе и системе, состоящей из функционально-необходимых элементов, одинаково. При увеличении механической постоянной времени исполнительного двигателя качество переходного режима в робастной силовой следящей системе ухудшается, а при ($T_M=0,03$ с) система становится неустойчивой.

Таким образом, качество функционирования робастной силовой следящей системы при параметрических и внешних возмущениях выше качества функционирования «штатной» силовой системы и системы, состоящей из функционально-необходимых элементов. Однако локальные показатели качества переходного режима в робастной силовой следящей системе хуже, нежели в «штатной» силовой системе и силовой системе, состоящей из функционально-необходимых элементов.

SIMULATION OF THE ROBUST SYSTEMS IN GENERALIZED DETERMINISTIC PERTURBATION

V.A. GANE, N.T AHMED

Abstract

Mathematical modeling and analysis of quality of robust systems for deterministic generalized perturbation for the example of the power tracking system consisting of a measuring device mismatches, amplifying and converting elements, actuators and control object. The transfer function of

the executive power system in the form of inertia is proportional to the integrating controller (PI) is represented.

Литература

1. *Ганэ В.А., Мацкевич А.Н.* Аналитические методы повышения качества управления. Минск, 2003.
2. *Никифоров В.О.* Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб., 2000.
3. *Егупов Н.Д., Пупков К.А.* Методы классической и современной теории автоматического управления. Синтез регуляторов систем автоматического управления. М., 2004.